

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：33504

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2021

課題番号：19K24295

研究課題名（和文）生体膝関節運動における脛骨高原および半月板の形状が及ぼす影響の解明

研究課題名（英文）Effects of tibial plateau and meniscus geometry on biological knee joint motion

研究代表者

遠藤 悠介（Endo, Yusuke）

健康科学大学・健康科学部・助教

研究者番号：20850564

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は脛骨後方傾斜(PTS)角度が膝関節バイオメカニクスに及ぼす影響を明らかにすることである。健常者31名を対象にMR画像診断装置を用いてPTS角度の計測および、着地動作時の膝関節角度と下肢筋電図の計測を実施した。PTS角度は女性の方が男性よりも有意に大きい結果であり、また男女ともにPTS角度と脛骨回旋角度変化量の間に有意な相関関係を認めた。筋電図解析では、女性の下肢筋活動とPTS角度に有意な回帰関係を確認した。本研究ではPTS角度が膝関節バイオメカニクスに与える影響について明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は脛骨の解剖学的特徴と膝関節バイオメカニクスの関係を明らかにすることで、膝前十字靭帯(ACL)損傷の受傷メカニズムの解明に寄与することを目指した研究である。本研究によって、脛骨後方傾斜(PTS)角度はACL損傷を引き起こす脛骨内旋運動と関係することが明らかとなった。PTS角度の計測にはMRIなどの医療用画像が必要であるが、ACL損傷者は診断時に画像診断が行われている。このことから、PTS角度はACL再建術を実施した患者の再受傷の予防と親和性の高い指標であることが考えられる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to determine the effect of posterior tibial slope (PTS) angle on knee joint biomechanics. PTS angle was measured in 31 healthy subjects using an MR imaging system, and knee joint angles and lower limb electromyograms were measured during landing motion. PTS angle was significantly greater in women than in men, and a significant correlation was found between PTS angle and tibial rotation angle change in both genders. EMG analysis confirmed a significant regression relationship between lower extremity muscle activity and PTS angle in women. The present study provides insight into the influence of PTS angle on knee biomechanics.

研究分野：スポーツ科学

キーワード：膝前十字靭帯損傷 脛骨後方傾斜角度 三次元動作分析 表面筋電図 MRI画像診断装置

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

膝前十字靭帯 (Anterior Cruciate Ligament; ACL) 損傷は長期の治療期間を要する重篤なスポーツ外傷である。ACL 損傷後には膝崩れなどの膝関節不安定性によって日常生活に支障をきたし、膝関節の安定性を復元するために ACL 再建術が行われる。しかしながら ACL 損傷の疾患特性として、再建術を施行した後であっても再受傷が高いことが挙げられる。長期間の治療が必要であることや、再受傷が多いことなどから、ACL 損傷の発症リスクや受傷メカニズムを明らかにするための研究が多く行われている。ACL 損傷の発生には多くの危険因子が関与し、解剖学的因子の多くは生まれ持った因子として考えられ、トレーニングや環境の変化によって修正が困難である内的因子として分類されている。ACL 損傷の疾患特性から ACL 損傷を予防することは極めて重要な課題であり、そのためには ACL 損傷の危険因子や受傷メカニズムを明らかにすることが必要である。ACL 損傷の解剖学的危険因子である脛骨高原に存在する脛骨後方傾斜 (Posterior Tibial Slope; PTS) 角度と ACL 損傷の関連については ACL 損傷者が大きな PTS 角度を有していることや、女性の方が PTS 角度が大きいことなどの報告が存在するが、PTS 角度と生体の膝関節バイオメカニクスについて明らかにした報告は少ない。

2. 研究の目的

本研究によって PTS 角度と膝関節バイオメカニクスの関係性を明らかにすることにより、ACL 損傷の受傷メカニズム解明の観点から有用な知見になり得ると考える。本研究の目的は PTS 角度が膝関節バイオメカニクスに及ぼす影響を明らかにすることである。

3. 研究の方法

本研究は以下の第 1 研究、第 2 研究、第 3 研究から構成した。

第 1 研究：脛骨後方傾斜角度の性差

第 2 研究：脛骨後方傾斜角度と膝関節 kinematics の運動学的関係

第 3 研究：脛骨後方傾斜角度と下肢筋活動の関係

3-(1). 第 1 研究

第 1 研究では、健常者の PTS 角度の性別による影響の観点から明らかにすることを目的として、健常者 31 名 (男性 15 名、女性 16 名) を対象に MR 画像診断装置を用いて PTS 角度の計測を実施した。対象者の基本情報は Table 1 に示す。脛骨高原の構造を三次元的に捉えるために、得られた MR 画像から PTS 角度を計測する際に内側の MPTS (Medial Posterior Tibial Slope) 角度、外側の LPTS (Lateral Posterior Tibial Slope) 角度に分離して、Figure 1 の A-D の手順にて PTS 角度計測を行った。利き脚の膝関節 MR 画像を用いて、性別ごとの PTS 角度の平均値の比較、LPTS 角度および MPTS 角度の度数分布を検討した。

Table 1. Demographic characteristics of the subjects.

Variables	Male		Female		Total	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
Number of Subject	15		16		31	
Age (years)	21.4	0.5	20.9	0.5	21.1	0.6
Height (mm)	1708.3	47	1577	49.9	1640.5	82
Weight (kg)	61.9	6.4	52.2	4.9	56.9	7.5
BMI (kg/m ²)	21.2	2.0	21.0	2.1	21.1	2.0

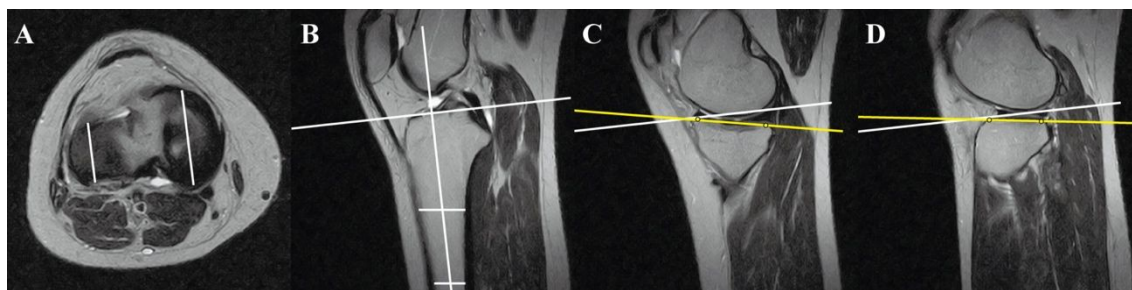


Figure 1. The measurement method for posterior tibial slope angle.

3-(2). 第 2 研究

健常者 31 名 (男性 15 名、女性 16 名) を対象に実施した。研究対象者の除外基準は、整形外科疾患があり計測に参加できない者、神経筋疾患などの疾病によりバランス障害を有する者、研

究責任者が研究への参加が不相当と判断した者とした。参加した研究対象者は第 1 研究と同一であり、身体的特性等の基本情報 (Table 1) は第 1 研究と同様の結果である。平均年齢は 21.1 ± 0.6 歳 (男性 21.4 ± 0.5 歳, 女性 20.9 ± 0.5 歳), 平均 BMI は 21.1 ± 2.0 (男性 21.2 ± 2.0 , 女性 21.0 ± 2.1) であった。

高さ 30cm の台から利き脚による片脚着地動作を実験試技とした。利き脚の定義は「ボールを蹴る時に使用する下肢」とした。片脚着地動作の計測に先立って、静止立位時の赤外線反射マーカース座標を計測した。静止立位時には、左右の下肢の幅は肩幅と同等になるように指示し、赤外線反射マーカースが隠れないように上肢は骨盤を把持させた。片脚着地動作の計測では、上肢の自由度を制限するために、両上肢は骨盤部を把持するように指示した。骨盤部から上肢が離れた場合、着地後に静止できなかった場合、過度な体幹・下肢の動揺が見られた場合、赤外線反射マーカースが貼付部位から移動または落下した場合は失敗試技とした。また研究対象者間で着地動作時の高さが変化しないよう、台の上から下方に降りるように着地する方法を指導した。研究対象者は片脚着地動作の練習を十分に実施した後、成功試技が 3 回記録されるまで片脚着地動作を実施した。実験空間内に 8 台の赤外線カメラを配置し、三次元動作分析装置 (VICON-MX, Vicon Motion Systems inc.) および床反力計 9287A (Kistler inc.) を用いて計測を実施した。計測周波数は赤外線カメラを 100Hz, 床反力計を 2000Hz に設定した。身体各部位への赤外線反射マーカースは 14mm のサイズを使用し、Point Cluster Technique に準じて身体 35 点に貼付した。得られた赤外線反射マーカースの三次元空間座標より、膝関節屈曲/伸展、膝関節外反/内反、脛骨外旋/内旋角度を算出した。Point Cluster Technique は一般的な歩行分析用マーカースセットである Plug-in Gait と比較して脛骨回旋角度の計測精度に優れた方法である。各動作試技から計測した三次元座標を用いて大腿および下腿の座標系から膝関節の関節角度を算出した。グローバル座標系は X 軸を左右方向, Y 軸を前後方向, Z 軸を上下方向とした。X 軸方向の回転運動を膝関節屈曲伸展角度, Y 軸方向の回転運動を膝関節内反外反角度, Z 軸方向の回転運動を脛骨内旋外旋角度と定義した。静的立位姿勢を基準姿勢とし、基準姿勢における変換行列を用いて片脚着地動作中の体節主軸から各動作時間における体節の座標系を求める。次に、大腿座標系の回転行列 $R(t)_{th}$ から下腿座標系 $R(t)_{sh}$ に変換した大腿座標系と下腿座標系間の回転行列 $R(t)_k$ を下式から算出し、膝関節角度を求めた。

$$R(t)_k = R(t)_{sh}R(t)_{th}^{-1}$$

解析には Matlab R2020b (Mathworks inc.) を用いた。解析区間は、床反力が計測された点を基準として、接地前 200ms から接地後 250ms までの 450ms を設定した。求めた各関節角度を解析区間に準じてデータの区間トリミングを行った後、それぞれの角度の最小値と最大値の値を角度変化量として算出した。Figure 2 に解析区間ならびに、kinematics パラメータ (角度変化量) の 1 例を示した。

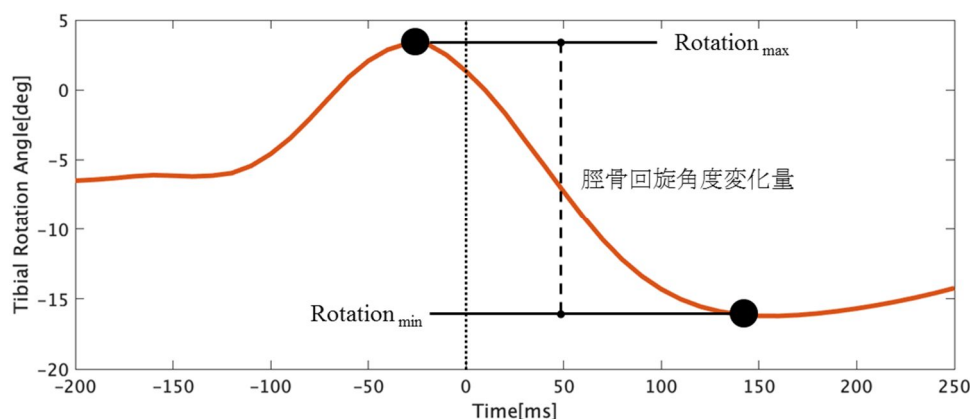


Figure 2. An example of knee joint kinematics variable calculation.

3-(3) . 第 3 研究

第 1 研究および第 2 研究へ参加した 31 名 (男性 15 名, 女性 16 名) を対象に計測を実施したが、男性 1 名にデータの欠損があったため、第 3 研究の研究対象者は 30 名 (男性 14 名, 女性 16 名) であった。研究対象者の平均年齢は 21.1 ± 0.5 歳 (男性 21.4 ± 0.5 歳, 女性 20.9 ± 0.5 歳), 平均 BMI は 21.1 ± 2.0 (男性 21.1 ± 2.0 , 女性 21.0 ± 2.1) であった。

無線型表面筋電図 Delsys Trigno (Delsys inc.) を用いて、30cm 台からの片脚着地動作時の下肢筋電図を計測した。下肢への表面電極センサーの貼付には、センサー用の両面シールを使用した。貼付した表面電極センサーの上から、センサーの落下防止目的にキネシオロジーテープを貼って補強した。表面筋電図センサーの被験筋は大腿直筋 (Rectus Femoris; RF), 内側広筋 (Vastus Medialis; VM), 外側広筋 (Vastus Lateralis; VL), 半腱様筋 (Semitendinosus; ST), 大腿二頭筋 (Biceps Femoris; BF), 中殿筋 (Gluteus Medius; GM) とした。筋電図の計測は筋電図計測用ソフトウェア EMGworks (Delsys inc.) を用いて行い、トリガーモジュールにより表面筋電図と三次元動作分析装置を同期した。また片脚着地動作の表面筋電図計測の実施に先立

ち、各被験筋の最大収縮時の筋活動量 (Maximum Voluntary Contraction; MVC) を 3 秒間計測した。各筋の最大筋活動の計測姿勢は、Manual Muscle Testing の段階 5 (Normal) の方法に準じて実施した。表面筋電図の計測周波数は 2000Hz とし、計測後に Band-pass filter (20-450Hz) を用いたフィルタ処理を行った。計測した MVC 筋電図データに対して、ウィンドウ幅 1 秒、スライド幅 0.005 秒の二乗平均平方根 (Root Mean Square; RMS) 処理を行い、RMS 処理した筋電図データの最大値を MVC 筋活動として採用した。筋活動を正規化するために、片脚着地動作時の筋活動を MVC 時の筋活動で除し、百分率で表した。表面筋電図データと同期した三次元動作分析装置の床反力データから、足部が床に接地した時点を同定した。足部接地点を基準とし、足部接地点より 200ms 前および 250ms 後の 450ms の 2 解析区間で平均%MVC を算出した。

4 . 研究成果

4 -(1) . 第 1 研究成果

PTS 角度の性別ごとの比較結果を Table 2 に示す。男性の平均 MPTS 角度は $9.2 \pm 2.4^\circ$, 女性の平均 MPTS 角度は $10.2 \pm 1.8^\circ$ であり女性の方が大きかったが、有意な差は認めなかった ($p=0.204$)。LPTS 角度の比較では、男性の平均 LPTS 角度は $8.8 \pm 1.7^\circ$, 女性の平均 LPTS 角度は $10.3 \pm 2.2^\circ$ であり、女性の方が男性よりも有意に大きい結果であった ($p=0.047$)。

計測した MPTS 角度および LPTS 角度を $4 \sim 14^\circ$ の間で 2° 間隔で 5 つのビンに分けて度数分布をヒストグラムにて図示した (Figure 2) 。その結果、LPTS 角度、MPTS 角度ともに $8 \sim 10^\circ$ のビンで最も高い出現頻度が高かった。

Table 2. PTS angle characteristics between males and females.

Variables	Male	Female	p value
MPTS angle (deg)	9.2 ± 2.4	10.2 ± 1.8	0.204
LPTS angle (deg)	8.8 ± 1.7	10.3 ± 2.2	0.047 *

* : $p < 0.05$

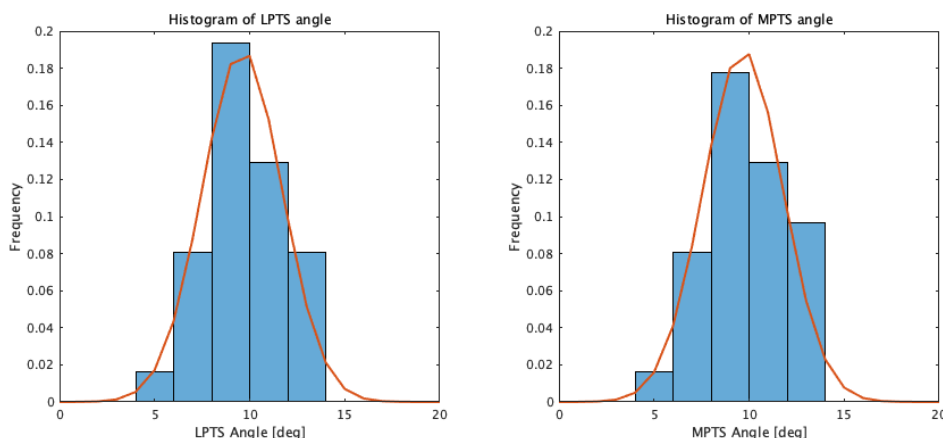


Figure 2. The histograms of frequency distribution for LPTS and MPTS angles.

4 -(2) . 第 2 研究成果

女性の PTS 角度と膝関節 kinematics 変数の相関関係の結果を Table 3 に示す。女性の LPTS 角度と脛骨回旋角度変化量の間には有意な正の相関関係を認めた ($r=0.611$, $p=0.006$)。また女性の MPTS 角度と脛骨回旋角度変化量の間にも同様に有意な正の相関関係を認めた ($r=0.439$, $p=0.044$)。男性の PTS 角度と膝関節 kinematics 変数の相関関係の結果を Table 6 に示す。また男性の LPTS 角度と脛骨回旋角度変化量の間には有意な正の相関関係を認めた ($r=0.690$, $p=0.002$)。また男性の MPTS 角度と脛骨回旋角度変化量の間にも同様に有意な正の相関関係を認めた ($r=0.716$, $p=0.001$)。

Table 3. Results of correlation coefficient between PTS angles and knee joint kinematics variables in female.

	膝関節屈伸角度変化量	膝関節内外反角度変化量	脛骨回旋角度変化量
LPTS 角度	0.323	0.175	0.611 *
MPTS 角度	0.293	0.163	0.439 *

* : $p < 0.05$

4 -(3) . 第 3 研究成果

女性の PTS 角度を独立変数、下肢筋活動を従属変数とした単回帰分析の結果、接地後の ST 筋活動と LPTS 角度、接地後の女性の BF 筋活動と MPTS 角度、接地後の G-med 筋活動と LPTS 角度の間に有意な回帰式が得られた (Table 4) 。接地後の LPTS 角度と ST 筋活動の間の決定係数

$R^2=0.356$ ，BF 筋活動との間の決定係数 $R^2=0.576$ であった。なお，男性の PTS 角度と下肢筋活動の間には統計学的に有意な関係は認めなかった。表内の回帰係数 α は PTS 角度の二乗の値に対する回帰係数，回帰係数 β は PTS 角度に対する回帰係数を表している。

Table 4. Results of regression analysis of PTS angle and lower limb muscle activity in female

従属変数	独立変数	決定係数 R^2	回帰係数 α	回帰係数 β	
接地前					
RF	MPTS 角度	0.080	0.932	-19.099	
	LPTS 角度	0.373	0.474	-7.281	
VM	MPTS 角度	0.151	1.040	-23.753	
	LPTS 角度	0.245	1.373	-27.432	
VL	MPTS 角度	0.102	1.340	-28.955	
	LPTS 角度	0.152	0.849	-15.393	
ST	MPTS 角度	0.151	0.213	-6.672	
	LPTS 角度	0.068	0.554	-11.478	
BF	MPTS 角度	0.309	0.054	-5.448	
	LPTS 角度	0.078	0.365	-8.868	
G-med	MPTS 角度	0.034	-0.060	0.309	
	LPTS 角度	0.428	0.679	-15.770	
接地後					
RF	MPTS 角度	0.268	4.219	-92.358	
	LPTS 角度	0.204	2.379	-44.477	
VM	MPTS 角度	0.078	0.264	-13.651	
	LPTS 角度	0.221	4.100	-75.460	
VL	MPTS 角度	0.128	3.028	-68.284	
	LPTS 角度	0.349	2.718	-46.138	
ST	MPTS 角度	0.103	1.235	-29.081	
	LPTS 角度	0.356	2.796	-54.290	*
BF	MPTS 角度	0.576	2.555	-58.024	*
	LPTS 角度	0.186	1.423	-27.971	
G-med	MPTS 角度	0.025	0.417	-9.519	
	LPTS 角度	0.491	1.899	-37.985	*

* : $p<0.05$

5 . 考察

本研究では，PTS 角度が ACL 損傷を引き起こす因子となり得るかを明らかにするために，PTS 角度と膝関節バイオメカニクスの関係について 3 つの研究によって検討した。

第 1 研究では，健常者において LPTS 角度は女性の方が大きいことを明らかにした。PTS 角度の度数分布を調査した結果，LPTS 角度および MPTS 角度のいずれの角度においても 8-10° の出現頻度が高いことが明らかになった。本研究によっても女性の方が大きいことが明らかとなり，女性に発症が多い ACL 損傷の要因となる可能性が示唆された。

第 2 研究では，LPTS 角度および MPTS 角度と脛骨回旋角度変化量の間に関連関係を認めた。この結果はいずれの性別にも確認された。これらの結果から，ACL 損傷と脛骨内旋角度の増大は密接な関係があると考えられ，本研究の結果は脛骨内旋角度を増大させる要因として PTS 角度の大きさが関与していることが示唆された。

第 3 研究では，女性の LPTS 角度と ST 筋活動，MPTS 角度と BF 筋活動，LPTS 角度と G-med 筋活動に有意な回帰関係を認めた。この結果は，PTS 角度によって誘発された膝関節 kinematics に対して防御反応としてハムストリングの筋活動が増大したと考えられる。

本研究が目指す最終的な目的は ACL 損傷の受傷率の低下および ACL 損傷の再受傷の予防であり，ACL 損傷予防トレーニングに対する示唆を得ることが重要な本研究の立ち位置である。なお，本研究では半月板の形状がソフトウェアおよび計測機器の限界により計測が困難であった。今後は半月板の形状評価も含めて検討していく予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Endo Yusuke, Takemura Masahiro, Monma Masahiko, Mutsuzaki Hirotaka, Mizukami Masafumi	4. 巻 23
2. 論文標題 Difference in sex and the effect of a dominant lower extremity in the posterior tibial slope angle in healthy Japanese subjects	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Asia-Pacific Journal of Sports Medicine, Arthroscopy, Rehabilitation and Technology	6. 最初と最後の頁 8~12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.asmart.2020.09.002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Endo Yusuke, Kanai Yoshihide, Yozu Arito, Kobayashi Yasuto, Fukaya Takashi, Mutsuzaki Hirotaka	4. 巻 56
2. 論文標題 Influence of a Foot Insole for a Down Syndrome Patient with a Flat Foot: A Case Study	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Medicina	6. 最初と最後の頁 219~219
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/medicina56050219	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 梶原将也、門根秀樹、兵頭康次郎、高橋達也、遠藤悠介、金森章浩、山崎正志
2. 発表標題 二重課題を用いた片脚着地動作解析
3. 学会等名 第34回日本整形外科学会基礎学術集会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 遠藤悠介、水上昌文
2. 発表標題 Lateral Posterior Tibial Slopeは脛骨内旋運動を引き起こすか？
3. 学会等名 第8回日本スポーツ理学療法学会学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 遠藤悠介、粕山達也
2. 発表標題 競技復帰後のACL再建患者の片脚着地動作時の脛骨回旋角度の特徴
3. 学会等名 第10回日本スポーツリハビリテーション学会学術大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------